



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 0517558-5 B1



(22) Data do Depósito: 26/09/2005

(45) Data de Concessão: 02/07/2019

(54) Título: SISTEMA PARA RESFRIAR UM OBJETO COM NITROGÊNIO

(51) Int.Cl.: A61F 7/00.

(30) Prioridade Unionista: 27/09/2004 US 10/952,531.

(73) Titular(es): ADAGIO MEDICAL, INC..

(72) Inventor(es): PETER LITTRUP; ALEXEI V. BABKIN; ROBERT DUNCAN; SERGEY BOLDAREV.

(86) Pedido PCT: PCT US2005034532 de 26/09/2005

(87) Publicação PCT: WO 2006/137887 de 28/12/2006

(85) Data do Início da Fase Nacional: 27/03/2007

(57) Resumo: MÉTODOS E SISTEMAS PARA RESFRIAMENTO CRIOGÊNICO. A presente invenção refere-se aos métodos e sistemas que são fornecidos para resfriar um objeto com uma substância criogênica tendo um ponto crítico definido por uma pressão de ponto crítico e uma temperatura de ponto crítico. Uma pressão da substância criogênica é elevada acima de um valor de pressão determinado para fornecer a substância criogênica em um volume molar reduzido que impede o bloqueio de vapor. Depois disso, a substância criogênica é colocada em comunicação térmica com o objeto para aumentar uma temperatura da substância criogênica ao longo de um caminho termodinâmico que mantém a pressão maior do que a pressão de ponto crítico durante uma duração que a substância criogênica e o objeto estão em comunicação térmica.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"SISTEMA PARA RESFRIAR UM OBJETO COM NITROGÊNIO"**.

REFERÊNCIAS CRUZADAS AOS PEDIDOS RELACIONADOS

Este pedido é uma continuação em parte do Pedido de Patente U.S. Nº 10/757.769, intitulado "CRYOTHERAPY SYSTEM", depositado em 14 de janeiro de 2004 por Peter J. Littrup *et al.*, que é um não provisório que reivindica o benefício da data de depósito do Pedido Prov. U.S. Nº 60/440.662, intitulado "CRYOSURGICAL SYSTEM", depositado em 15 de Janeiro de 2003 por Peter Littrup *et al.*, as divulgações inteiras de ambas as quais são incorporadas aqui por referência para todos os propósitos, incluindo os anexos. Este pedido também é uma continuação em parte do Pedido de Patente U.S. Nº 10/757.768, intitulado "CRYOTHERAPY PROBE", depositado em 14 de janeiro de 2004 por Peter J. Littrup *et al.*, que é um não provisório que reivindica o benefício da data de depósito da Pedido de Patente Prov. U.S. Nº 60/440.541, intitulado "CRYOSURGICAL PROBE", depositado em 15 de janeiro de 2003 por Peter Littrup *et al.*, a divulgação inteira do qual é incorporada aqui por referência para todos os propósitos, incluindo os anexos.

FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

A presente invenção refere-se aos métodos e sistemas para resfriamento criogênico. "Resfriamento criogênico" no geral refere-se aos processos que usam gases liquefeitos, isto é "substâncias criogênicas", em fornecer o resfriamento, que pode tomar a forma de congelamento ou simplesmente resfriar um sistema ou material.

Existem aplicações numerosas, tanto médicas quanto não médicas, em que é desejável fornecer resfriamento eficaz. Qualquer processo de resfriamento pode ser considerado como envolvendo um ou mais de quatro processos básicos que resultam na remoção de uma carga térmica: evaporação, condução, radiação, e convecção. Um desafio que é apresentado nas técnicas de resfriamento criogênico resulta do processo de evaporação, e pode ser entendido considerando-se o resfriamento dentro de um canal pequeno. O processo de evaporação de um gás liquefeito resulta em expansão

enorme conforme o líquido converte-se a um gás; a expansão do volume é da ordem de um fator de 200. Em um sistema de diâmetro pequeno, este grau de expansão consistentemente resulta em um fenômeno conhecido na técnica como "bloqueio de vapor". O fenômeno é exemplificado pelo fluxo de

5 uma substância criogênica em um tubo de diâmetro fino, tal como é comumente fornecido em uma criossonda. Um volume relativamente maciço de gás expansível que se forma antes dele impede o fluxo da substância criogênica líquida. As técnicas tradicionais que foram usadas para evitar o bloqueio de vapor incluíram restrições no diâmetro do tubo, requerendo que ele

10 seja suficientemente grande para acomodar os efeitos evaporativos que leva ao bloqueio de vapor. Outras configurações de criossonda e tubulação complexas foram usadas para a o gás N_2 de "ventilação" visto que ele formou ao longo da tubulação de transporte. Estes projetos também contribuem para limitar a eficácia de custo e diâmetro da sonda.

15 Conseqüentemente existe uma necessidade geral na técnica para métodos e sistemas melhorados para fornecer o resfriamento criogênico.

BREVE SUMÁRIO DA INVENÇÃO

As modalidades da invenção fornecem assim métodos e siste-

20 mas para resfriar um objeto. Os métodos e sistemas fornecem mudanças em características de pressão/temperatura que evitam a ocorrência de bloqueio de vapor seguindo-se um caminho termodinâmico que nunca cruza uma linha de fase líquido-gás da substância criogênica. Em várias modalidades, isto é, obtido mantendo-se a pressão da substância criogênica próxima ou

25 acima de sua pressão de ponto crítico. Em muitas Modalidades, a substância criogênica compreende nitrogênio (N_2), embora outras substâncias criogênicas possam ser usadas em outras Modalidades.

Em um primeiro conjunto de Modalidades, um método é fornecido para resfriar um objeto com uma substância criogênica tendo um ponto

30 crítico definido por uma pressão de ponto crítico e uma temperatura de ponto crítico. Uma pressão da substância criogênica é elevada acima de sua pressão de ponto crítico. Depois disso, a substância criogênica é colocada em

comunicação térmica com o objeto para aumentar uma temperatura da substância criogênica ao longo de um caminho termodinâmico que mantém a pressão maior do que a pressão de ponto crítico durante uma duração que a substância criogênica e o objeto estão em comunicação térmica.

- 5 Em alguns exemplos, o caminho termodinâmico pode aumentar a temperatura da substância criogênica a uma temperatura ambiente. A pressão da substância criogênica pode ser reduzida a uma pressão ambiente depois de remover a substância criogênica da comunicação térmica com o objeto. Em algumas Modalidades, depois de elevar a pressão da substância
- 10 criogênica acima de sua temperatura de ponto crítico e antes de colocar a substância criogênica em comunicação térmica com o objeto, a temperatura da substância criogênica é reduzida sem diminuir a pressão da substância criogênica abaixo de sua pressão de ponto crítico. Por exemplo, a temperatura da substância criogênica pode ser reduzida colocando-se a substância
- 15 criogênica em comunicação térmica com uma segunda substância criogênica líquida tendo uma temperatura mais baixa do que a temperatura da substância criogênica. A substância criogênica e a segunda substância criogênica podem ser quimicamente idênticas, e a segunda substância criogênica líquida pode estar substancialmente na pressão ambiente. Em uma modalidade, a pressão da substância criogênica é substancialmente constante em-
- 20 bora reduzindo a temperatura da substância criogênica.

- Quando a pressão da substância criogênica é elevada acima de sua pressão de ponto crítico, a pressão da substância criogênica pode ser elevada até próximo ou aproximadamente em sua pressão de ponto crítico.
- 25 Também, quando a pressão da substância criogênica é elevada acima de sua pressão de ponto crítico, a substância criogênica pode ser fornecida em aproximadamente sua temperatura de ponto crítico. Em uma modalidade, a substância criogênica é fornecida em uma temperatura dentro de $\pm 10\%$ de sua temperatura de ponto crítico. A pressão da substância criogênica pode
- 30 ser elevada acima de sua pressão de ponto crítico em uma modalidade colocando-se a substância criogênica dentro de um tanque termicamente isolado e aplicando calor dentro do tanque pelo menos até que um pressão

predeterminada dentro do tanque seja atingida.

Em um segundo conjunto de modalidades, um outro método é fornecido para resfriar um objeto com uma substância criogênica tendo um ponto crítico definido por uma pressão de ponto crítico e uma temperatura de ponto crítico. Uma pressão da substância criogênica é elevada até entre 0,8 e 1,2 de sua pressão de ponto crítico e a substância criogênica é fornecida em uma temperatura dentro de $\pm 10\%$ de sua temperatura de ponto crítico. A temperatura da substância criogênica é depois disso reduzida sem diminuir a pressão abaixo de 0,8 vezes sua pressão de ponto crítico. Depois disso, a substância criogênica é colocada em comunicação térmica com o objeto para aumentar a temperatura da substância criogênica a uma temperatura ambiente ao longo de um caminho termodinâmico que mantém uma pressão maior do que 0,8 vezes da pressão de ponto crítico durante uma duração que a substância criogênica e o objeto estão em comunicação térmica. A substância criogênica é subsequenteiramente removida da comunicação térmica com o objeto e a pressão da substância criogênica é reduzida a uma pressão ambiente.

Em um terceiro conjunto de modalidades, um outro método é fornecido para resfriar um objeto com uma substância criogênica tendo um ponto crítico definido por uma pressão de ponto crítico e uma temperatura de ponto crítico. Uma pressão da substância criogênica é elevada até próximo à sua pressão de ponto crítico. Depois disso, a substância criogênica é colocada em comunicação térmica com o objeto para aumentar uma temperatura da substância criogênica ao longo de um caminho termodinâmico que mantém a pressão próxima à pressão de ponto crítico durante uma duração que a substância criogênica e o objeto estão em comunicação térmica. A pressão pode ser elevada próximo à pressão de ponto crítico elevando-se a pressão da substância criogênica para mais do que um valor de pressão determinado para fornecer a substância criogênica em um volume molar reduzido que impede o bloqueio de vapor, com o caminho termodinâmico mantendo a pressão acima do valor de pressão determinado. Em alguns exemplos, o valor de pressão determinado está entre 0,8 e 1,2 vezes a pressão

de ponto crítico.

Em um quarto conjunto de modalidades, um sistema é fornecido para resfriar um objeto com uma substância criogênica tendo um ponto crítico definido por uma pressão de ponto crítico e uma temperatura de ponto crítico. Um gerador de substância criogênica é adaptado para aumentar uma pressão da substância criogênica. Uma válvula é fornecida em uma saída do gerador de substância criogênica e adaptada para liberar um fluxo da substância criogênica quando a pressão da substância criogênica excede uma pressão predeterminada dentro do gerador de substância criogênica. A pressão predeterminada é maior do que um valor de pressão determinado para fornecer a substância criogênica em um volume molar reduzido que impede o bloqueio de vapor. Um dispositivo de aplicação criogênica também é fornecido e adaptado para ser levado em comunicação térmica com o objeto. Um conduíte conecta a válvula com o dispositivo de aplicação criogênica para transportar a substância criogênica da válvula ao dispositivo de aplicação criogênica. Um controlador de fluxo regula o fluxo da substância criogênica através do conduíte e dispositivo de aplicação criogênica. A substância criogênica aumenta em temperatura quando o dispositivo de aplicação está em comunicação térmica com o objeto ao longo de um caminho termodinâmico que mantém a pressão da substância criogênica acima da pressão predeterminada durante uma duração que o dispositivo de aplicação e a substância criogênica estão em comunicação térmica.

O gerador de substância criogênica pode compreender um tanque termicamente isolado tendo um volume interior para reter a substância criogênica e um elemento de aquecimento para aplicar calor dentro do volume interior. Em uma modalidade, o elemento de aquecimento compreende um elemento de aquecimento resistente. Um banho de uma segunda substância criogênica líquida pode envolver uma porção do conduíte entre a válvula e o dispositivo de aplicação criogênica. Em uma modalidade, o banho da segunda substância criogênica líquida está em pressão substancialmente ambiente. Em uma outra modalidade, a substância criogênica e a segunda substância criogênica são quimicamente idênticas.

Em certas modalidades, o gerador de substância criogênica compreende uma pluralidade de geradores de substância criogênica e a válvula compreende uma pluralidade de válvulas. Cada um da pluralidade de geradores de substância criogênica é adaptado para aumentar a pressão da substância criogênica. Cada uma da pluralidade de válvulas é fornecida em uma saída de um da pluralidade de geradores de substância criogênica e configurada para liberar um fluxo da substância criogênica quando a pressão da substância criogênica excede uma pressão predeterminada dentro de um da pluralidade de geradores de substância criogênica. O conduíte é configurado para fornecer uma conexão seletiva entre uma da pluralidade de válvulas e o dispositivo de aplicação criogênica. Em algumas tais modalidades, o sistema ainda compreende um banho líquido da substância criogênica, com a pluralidade de geradores de substância criogênica dispostos dentro do banho líquido. Além disso, o sistema pode ainda compreender uma pluralidade de trocadores de calor, cada um dos quais está disposto dentro do banho líquido da substância criogênica e em comunicação de fluido entre uma unidade respectiva da pluralidade de geradores de substância criogênica e o conduíte. Cada um da pluralidade de geradores de substância criogênica pode adicionalmente compreender uma entrada para receber a substância criogênica do banho líquido da substância criogênica. O dispositivo de aplicação criogênica pode compreender um bocal de controle de pulverização destacável, que em alguns exemplos podem compreender uma ventilação adaptada para liberar substância criogênica refletida durante o uso do dispositivo de aplicação criogênica. Em uma modalidade, o sistema ainda compreende um dispositivo de termometria adaptado para medir uma temperatura do objeto.

Em um quinto conjunto de modalidades, um método é fornecido para resfriar um objeto com uma substância criogênica tendo um ponto crítico definido por uma pressão de ponto crítico e uma temperatura de ponto crítico. Uma pressão da substância criogênica é elevada em um primeiro gerador de substância criogênica acima de um valor de pressão determinado para fornecer a substância criogênica em um volume molar reduzido que

impede o bloqueio de vapor. Depois disso, a substância criogênica é fluxada do primeiro gerador de substância criogênica para estar em comunicação térmica com o objeto e para ter uma pressão maior do que a pressão de ponto crítico, enquanto a substância criogênica e o objeto estão em comunicação térmica. Depois disso, uma pressão da substância criogênica em um segundo gerador de substância criogênica é elevada acima do valor de pressão determinado. Depois disso, a substância criogênica do segundo gerador de substância criogênica é fluxada para estar em comunicação térmica com o objeto e para ter uma pressão maior do que o valor de pressão determinado, enquanto a substância criogênica e o objeto estão em comunicação térmica. Depois disso, a substância criogênica no primeiro gerador de substância criogênica é reabastecida.

Em algumas tais modalidades, quando a substância criogênica é fluxada do primeiro ou segundo gerador de substância criogênica, ela é fluxada através de um conduíte em comunicação térmica com um banho líquido para reduzir uma temperatura da substância criogênica. Em uma modalidade, a substância criogênica e o banho da substância criogênica líquida são quimicamente idênticas, com a substância criogênica no primeiro gerador de substância criogênica sendo reabastecida do banho da substância criogênica líquida. Quando a pressão da substância criogênica é elevada acima do valor de pressão determinado nos primeiro e segundo geradores de substância criogênica, ela pode ser elevada até próximo à sua pressão de ponto crítico. Em uma modalidade, aplicando calor dentro de um tanque termicamente isolado pelo menos até que uma pressão predeterminada dentro do tanque termicamente isolado seja atingida eleva a pressão.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Um outro entendimento da natureza e vantagens da presente invenção pode ser compreendido por referência às porções remanescentes do relatório descritivo e dos desenhos em que numerais de referência semelhantes são usados por todos os vários desenhos para referir-se aos componentes similares. Em alguns exemplos, um sub-rótulo é associado com um numeral de referência e segue um hífen para indicar um dos componentes

similares múltiplos. Quando a referência é feita a um numeral de referência sem especificação a um sub-rótulo existente, ela é intencionada a referir-se a todos os tais componentes similares múltiplos.

5 A Figura 1A ilustra um diagrama de fase de substância criogênica típica;

A Figura 1B fornece uma ilustração de como determinar uma pressão de operação mínima para uma sonda criogênica;

10 A Figura 1C usa um diagrama de fase de substância criogênica para ilustrar a ocorrência de bloqueio de vapor com resfriamento de substância criogênica de fluxo simples;

A Figura 1D usa um diagrama de fase de substância criogênica para ilustrar um ciclo de resfriamento usado em resfriamento de Joule-Thomson para evitar a ocorrência de bloqueio de vapor;

15 A Figura 2A é uma ilustração esquemática de um sistema de resfriamento criogênico de acordo com uma modalidade da invenção;

A Figura 2B usa um diagrama de fase de substância criogênica para ilustrar um método para resfriamento criogênico em uma modalidade da invenção;

20 A Figura 3 fornece um diagrama de fluxo que resume os aspectos do método de resfriamento da Figura 2A;

A Figura 4 é uma ilustração esquemática de um sistema de resfriamento criogênico de acordo com uma outra modalidade da invenção;

A Figura 5 é uma ilustração esquemática de um sistema de resfriamento criogênico de acordo com uma outra modalidade da invenção;

25 A Figura 6 é uma fotografia de uma modalidade de um sistema criogênico configurado como um dispositivo portátil independente;

30 A Figura 7A mostra uma outra modalidade portátil que permite pontas permutáveis para conduzir o nitrogênio aproximadamente crítico como uma pulverização de precisão ou como mais exatamente uma cobertura circular dispersada para áreas de vários diâmetros;

A Figura 7B ilustra um tratamento de superfície combinado do tumor com uma ponta em cone em combinação com uma agulha ventilada

intersticial, assim como monitoramento mais profundo com um arranjo de termometria resistente de ponto múltiplo; e

A Figura 8 fornece uma comparação gráfica de energia de resfriamento para processos de resfriamento criogênico diferentes.

5 DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

As modalidades da invenção fazem uso de processos termodinâmicos usando substâncias criogênicas que fornecem resfriamento sem encontrar o fenômeno de bloqueio de vapor. Vários outros benefícios e vantagens fornecidos em diferentes modalidades da invenção são evidentes da descrição seguinte.

Este pedido usa diagramas de fase para ilustrar e comparar vários processos termodinâmicos. Tais diagramas de fase são bem conhecidos na técnica e um exemplo típico para uma substância criogênica que é fornecida na Figura 1A. Os eixos do diagrama correspondem a pressão P e temperatura T , e inclui uma linha de fase 102 que delinea o local de todos os pontos (P , T) onde o líquido e o gás coexistem. Para valores de (P , T) à esquerda da linha de fase 102, a substância criogênica está em um estado líquido, no geral obtido com pressões mais altas e temperaturas mais baixas, enquanto os valores de (P , T) à direita da linha de fase 102 define regiões onde a substância criogênica está em um estado gasoso, no geral obtido com pressões mais baixas e temperaturas mais altas. A linha de fase 102 termina abruptamente em um ponto único conhecido como o ponto crítico 104. No caso de nitrogênio N_2 , o ponto crítico está em $P_c = 33,94$ bar e $T_c = -147,15^\circ\text{C}$.

Quando um fluido tem tanto fases líquidas quanto gasosas presentes durante um aumento gradual em pressão, o sistema promove ao longo da linha de fase líquido-gás 102. No caso de N_2 , o líquido em pressões baixas é até duzentas vezes mais denso do que a fase de gás. Um aumento contínuo em pressão faz com que a densidade do líquido diminua e a densidade da fase de gás aumente, até que eles sejam exatamente iguais apenas no ponto crítico 104. A distinção entre líquido e gás desaparece no ponto crítico 104. O bloqueio de fluxo dianteiro pela expansão de gás antes da

substância criogênica líquida é assim evitada por condições envolvendo o ponto crítico, definido aqui como "condições aproximadamente críticas". Os fatores que permitem maior saída do ponto crítico embora mantendo um fluxo funcional incluem velocidade maior do fluxo da substância criogênica, diâmetro maior do lúmen do fluxo e carga térmica mais baixa no trocador térmico, ou ponta da criossonda.

Visto que o ponto crítico aproxima-se debaixo, a densidade da fase de vapor aumenta e a densidade da fase líquida diminui até exatamente no ponto crítico, onde as densidades destas duas fases são exatamente iguais. Acima do ponto crítico, a distinção de fases líquidas e de vapor desaparece, deixando apenas uma única fase supercrítica. Todos os gases obedecem muito bem a equação de van der Waals seguinte do estado:

$$\left(p + \frac{3}{v^2}\right)(3v - 1) = 8t, \quad [\text{Eq. 1}]$$

onde $p \equiv P/P_c$, $v \equiv V/V_c$, e $t \equiv T/T_c$, e P_c , V_c , e T_c são a pressão crítica, volume molar crítico, e a temperatura crítica respectivamente. As variáveis v , p , e t são freqüentemente referidas como o "volume molar reduzido", a "pressão reduzida", e a "temperatura reduzida", respectivamente. Conseqüentemente, quaisquer duas substâncias com os mesmos valores de p , v , e t estão no mesmo estado termodinâmico de fluido próximo ao seu ponto crítico. A Eq. 1 é assim referida como incorporando a "Law of Corresponding States". Isto é descrito mais completamente em H.E. Stanley, *Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena* (Oxford Science Publications, 1971), a descrição inteira da qual é incorporada aqui por referência para todos os propósitos. O rearranjo da Eq. 1 fornece a expressão seguinte para v como uma função de p e t :

$$pv^3 - (p + 8t)v^2 + 9v - 3 = 0. \quad [\text{Eq. 2}]$$

A redução do volume molar do fluido v pode ser assim considerada como sendo uma função exata de apenas a pressão reduzida t e a pressão reduzida p .

Tipicamente, nas modalidades da invenção, a pressão reduzida p é fixa em um valor constante de aproximadamente um, e conseqüente-

mente em uma pressão física fixa próxima à pressão crítica, embora a temperatura reduzida t varie com a carga térmica aplicada à agulha. Se a pressão reduzida p for uma constante determinada pela engenharia do sistema, então o volume molar reduzido v é uma função exata da temperatura reduzida t . Nas modalidades da invenção, a pressão de operação da agulha p pode ser ajustada de modo que durante o curso das variações na temperatura t da agulha, v é mantido abaixo de algum valor máximo no qual a condição de bloqueio de vapor resultará. No geral é desejável manter p no valor mais baixo no qual este é constante visto que elevando a pressão para obter valores mais altos de p pode envolver o uso de um compressor mais complexo e mais caro, resultando em aquisição e manutenção mais cara do sistema de suporte da agulha inteiro e a eficiência da tomada de parede global mais baixa. Como usado aqui, "eficiência da tomada de parede" refere-se à energia de resfriamento total de uma agulha dividido pela energia obtido de uma linha para operar o sistema.

As condições que necessitam ser colocadas em v dependem de um modo complexo e não analítico da taxa de fluxo do volume dV/dt , da capacidade de calor das fases de líquido e vapor, e das propriedades de transporte tais como a condutividade térmica, viscosidade, etc., tanto no líquido quanto no vapor. Este relacionamento exato não pode ser derivado na forma fechada algebricamente, mas pode ser determinado numericamente integrando-se as equações modelo que descrevem a massa e o transporte de calor dentro da agulha. Conceitualmente, o bloqueio de vapor ocorre quando a taxa de aquecimento da agulha produz a fase de vapor, e quando a energia de resfriamento desta fase de vapor, que é proporcional à taxa de fluxo do vapor vezes sua capacidade de calor dividido por seu volume molar, não está apta para continuar com a taxa de aquecimento à agulha. Quando isto ocorre, mais e mais da fase de vapor é formada de modo a absorver o excesso de calor através da conversão da fase líquida para vapor no fluxo da substância criogênica. Isto cria uma condição descontrolada onde o líquido converte em fase de vapor para encher a agulha, e efetivamente todo o fluxo da substância criogênica pára devido à pressão grande que resulta nesta

fase de vapor conforme o fluxo de calor na agulha aumenta sua temperatura e pressão rapidamente. Esta condição é chamada de "bloqueio de vapor". Visto que as fases de líquido e vapor são idênticas em seu volume molar, e conseqüentemente a energia de resfriamento no ponto crítico, o sistema de resfriamento em ou acima do ponto crítico nunca pode bloquear o vapor. Mas para condições levemente abaixo do crítico abaixo do ponto crítico, a agulha também pode evitar o bloqueio de vapor. Um relacionamento entre um volume molar mínimo aceitável, correspondendo à densidade da fase de gás mínima aceitável, e dimensões da agulha, taxa de fluxo, e propriedades termodinâmicas de gás e fases líquidas é uma consequência de um sistema não linear manifestamente complexo. Uma determinação de quão grande v pode ser, e conseqüentemente como pequeno p pode ser, para confiantemente evitar o bloqueio de vapor podendo ser determinado experimentalmente, como ilustrado com a data mostrada na Figura 1B.

A Figura 1B exibe como uma pressão de operação mínima P , e conseqüentemente a pressão mínima reduzida p , é determinada experimentalmente. A curva superior no painel de topo mostra a pressão de nitrogênio na agulha e a curva de fundo no painel de topo mostra a taxa de fluxo da massa resultante através da sonda, exibida em unidades de litros padrão por segundo através da agulha. O painel de fundo mostra a temperatura da ponta da agulha ao mesmo tempo como o gráfico de topo. Uma carga térmica de 6,6 W foi aplicada à ponta da agulha embora estes dados foram tomados. Por exemplo, em uma pressão de operação de 12,6 bar e 22 bar uma condição de bloqueio de vapor ocorreu neste nível de carga térmica e taxa de fluxo, como comprovado pelo declínio da temperatura da ponta da agulha para recuperar seu valor de temperatura baixo quando o fluxo foi momentaneamente interrompido e depois de retomado. Mas em 28,5 bar de pressão, a temperatura de ponta recuperou seu valor de temperatura baixo confiantemente seguindo uma interrupção de fluxo. A direção a jusante na taxa de fluxo da massa através da agulha é indicativo de ser muito fechada, ainda levemente abaixo da pressão aceitável mais baixa a confiável, a continua a operação sem bloqueio de vapor. Estes dados sugerem que cerca de 29 bar

de pressão é a pressão aceitável mais baixa de operação neste modalidade ilustrativa. Assim, para esta modalidade, em que uma agulha encamisada a vácuo com capilares de 22 cm de comprimento de 0,020 cm de diâmetro para o capilar de influxo e 0,030 cm diâmetro para o capilar de fluxo, sob esta carga térmica e taxa de fluxo, 29 bar é uma pressão de operação mínima típica. Isto corresponde a um p mínimo = $29 \text{ bar} / 33,9 \text{ bar} = 0,85$. Consequentemente, nesta modalidade ilustrativa, "aproximadamente crítica" corresponde a uma pressão não menos do que 85% da pressão crítica.

Mais no geral, as referências aqui a uma pressão "aproximadamente crítica" são intencionados para referir-se a uma pressão que excede uma pressão mínima determinada para satisfazer as condições descritas acima. Em particular, uma vez que o valor mínimo de p foi determinado, tal como com o procedimento experimental descrito, a faixa de pressão "aproximadamente crítica" inclui todos valores de $p = P/P_c$, que estão em ou acima da pressão mínima determinada. Embora qualquer pressão supercrítica tendo $p > 1$ no geral é aceitável para evitar o bloqueio de vapor, os inventores têm descoberto que na prática o valor mínimo de p que pode ser usado sem criar as condições de bloqueio de vapor pode ser mais baixa, e o uso de um tal valor mais baixo pode vantajosamente melhorar a eficiência e simplicidade do sistema.

A ocorrência de bloqueio de vapor em um sistema de resfriamento de substância criogênica de fluxo simples pode ser entendida com referência à Figura 1C, que para propósitos exemplares mostra o diagrama de fase para N_2 , com linha de fase líquido-gás 106 terminando no ponto crítico 108. O resfriamento de fluxo simples procede comprimindo-se a substância criogênica líquida e forçando-a a fluir através de uma criossonda. Algum pré-resfriamento pode ser usado para forçar a substância criogênica de fase líquida através de uma entrada 110 da criossonda do ponto indicado no diagrama de fase à região onde a substância criogênica evapora para fornecer resfriamento evaporativo. O caminho termodinâmico 116 tomado pela substância criogênica conforme ela é forçada da entrada 110 a uma ventilação 114 que cruza a linha de fase líquido-gás 106 no ponto 112, onde a evapo-

ração ocorre. Porque a evaporação ocorre em um ponto ao longo da linha de fase líquido-gás 106 bem abaixo do ponto crítico 108, existe uma expansão dramática do volume da corrente do fluxo como o líquido muito mais denso evapora em sua fase gasosa, levando à ocorrência do bloqueio de vapor.

5 Uma técnica de resfriamento de substância criogênica alternativa que evita o bloqueio de vapor à custa de várias complexidades explora o efeito de Joule-Thomson. Quando um gás é comprimido, existe uma redução em sua entalpia, o tamanho da redução varia com a pressão. Quando o gás é depois expandido através de uma pequena porta (referida como uma "por-
10 ta JT" ou "regulador") a uma pressão mais baixa, existe uma redução na temperatura, com o resfriamento resultante sendo uma função da diminuição na entalpia durante a compressão. Com um trocador de calor fornecido entre o compressor e a válvula de expansão, progressivamente temperaturas mais baixas podem ser atingidas. Em alguns exemplos, o resfriamento de Joule-
15 Thomson usa gases mais baratos semelhantes ao CO_2 ou N_2O , embora as temperaturas mais baixas possam ser atingidas com argônio (Ar). Podem haver riscos mais altos associados com o Ar além de seu custo mais alto, mas ambos destes podem ser justificados em algumas aplicações por causa da iniciação e terminação rápida do congelamento que pode ser fornecido.

20 Os processos de resfriamento Joule-Thomson assim usa um ciclo de resfriamento completamente diferente do que é usado para resfriamento de substância criogênica de fluxo simples, como ilustrado com o diagrama de fase da Figura 1D. O ciclo de resfriamento é mostrado sobreposto no diagrama de fase de N_2 como um exemplo específico, com a linha de fase
25 líquido-gás 122 para N_2 terminando em seu ponto crítico 128. O nitrogênio é inicialmente fornecido em pressões muito altas em temperatura ambiente normal (ambiente) no ponto 130 no diagrama de fase. A pressão é tipicamente cerca de 400 bar, isto é maior do que dez vezes a pressão no ponto crítico 128. O N_2 flui dentro de uma criossonda ao longo do caminho termo-
30 dinâmico 124 até que ele alcança a porta de expansão JT no ponto 132 no diagrama de fase. O N_2 expande-se abruptamente na porta JT, fluindo em um Jato JT 142 a jusante no diagrama de fase como sua pressão diminuindo

rapidamente. A expansão rápida faz com que o N_2 a jusante no jato 142 para parcialmente liquefazer de modo que segue a expansão no jato JT 142, o N_2 liquefeito está em equilíbrio térmico com sua fase gasosa. O nitrogênio assim está no ponto 134 no diagrama de fase, isto é na linha de fase líquido-gás 106 levemente acima da pressão ambiente, e portanto bem abaixo do ponto crítico 128. O nitrogênio é aquecido em um corrente de gás de retorno que segue o caminho termodinâmico 126 onde ele pode ser usado para resfriar, e é subsequenteiramente descarregado às condições ambiente através de uma ventilação 140, talvez no caminho de volta a um console de controle. É notável que o resfriamento de Joule-Thomson nunca aproxima-se do ponto crítico do sistema líquido-gás, e que ele usa predominantemente resfriamento de fluxo evaporativo.

O fluxo do gás resfriado no resfriamento de Joule-Thomson é tipicamente fornecido de volta ao longo de uma lado da linha de alimentação de alta pressão de entrada. Este contrafluxo do gás de retorno baixa pressão vantajosamente resfria o gás de alta pressão que entra antes da expansão. O efeito deste trocador de calor 144 entre as correntes de gás está evidente no diagrama de fase visto que a pressão ao longo da linha de entrada à porta JT (caminho termodinâmico 124) cai devido à sua impedância do fluxo conforme a corrente de gás de alta pressão é resfriada pelo trocador de calor do contrafluxo. Similarmente, a pressão da corrente de retorno (caminho termodinâmico 126) cai levemente conforme o nitrogênio frio, de baixa pressão resfria a corrente de entrada em alta pressão através do trocador de calor do contrafluxo 144. Os efeitos do trocador de calor do contrafluxo 144 são benéficos em melhorar a eficiência do resfriamento de Joule-Thomson, mas os limites para essa eficiência resultam da tentativa para tornar a agulha da criossonda menor em diâmetro. Como a agulha da criossonda torna-se menor, a velocidade do fluxo de gás de retorno torna-se maior, eventualmente alcançando a velocidade do som para as taxas do fluxo de volume típicos e projetos de sondas em sondas tendo um diâmetro de cerca de 1,5 mm. O processo de resfriamento Joule-Thomson continua a perder eficiência conforme a sonda é ainda miniaturizada, ao ponto onde não mais energia de

resfriamento pode ser gerada. As sondas com diâmetros $< 1,2$ mm são desse modo severamente limitadas pelas propriedades físicas de sua operação ao ponto onde elas teriam capacidade de resfriamento mínima, mesmo se elas fossem confiantemente construídas em um custo razoável. O custo de

5 construção da sonda Joule-Thomson aumenta rapidamente conforme o diâmetro da sonda é reduzido, primeiramente por causa dos custos de fabricação e montagem associados com o trocador de calor do contrafluxo.

As modalidades da invenção evitam a ocorrência de bloqueio de vapor e permitem tamanhos de sonda diminuídos operando-se em regimes

10 de pressão-temperatura de substância criogênica que evita qualquer cruzamento da linha de fase líquido-gás. Em modalidades particulares, o resfriamento criogênico é atingido operando-se próximo ao ponto crítico para a substância criogênica. Quando operando nesta região, o calor flui na substância criogênica aproximadamente crítica do ambiente adjacente visto que a

15 temperatura de ponto crítico (por exemplo, -147°C no caso de N_2) é muito mais frio que o ambiente adjacente. Este calor é removido pelo fluxo da substância criogênica aproximadamente crítica através da ponta de uma criossonda, mesmo ainda que não exista nenhum calor latente de evaporação para ajudar com o processo de resfriamento. Embora o escopo da invenção

20 seja intencionado para incluir a operação em qualquer regime tendo uma pressão maior do que a pressão de ponto crítico, a eficiência de resfriamento tende a diminuir conforme a pressão seja aumentada acima da pressão crítica. Esta é uma consequência de aumentar os requerimentos de energia necessários para obter o fluxo em pressões de operação mais altas.

25 A Figura 2A fornece uma ilustração esquemática de um arranjo estrutural para um sistema criogênico em uma modalidade, e a Figura 2B fornece um diagrama de fase que ilustra um caminho termodinâmico tomado pela substância criogênica quando o sistema da Figura 2A é operado. Os identificadores numéricos circulares nas duas figuras correspondem de modo

30 do que uma posição física é indicada na Figura 2A onde operando pontos identificados ao longo do caminho termodinâmico são atingidos. A descrição seguinte portanto, algumas vezes faz referência simultânea tanto para o de-

senho estrutural da Figura 2A quanto para o diagrama de fase da Figura 2B em descrever os aspectos físicos e termodinâmicos do fluxo de resfriamento. Para propósitos de ilustração, tanto as Figuras 2A quanto 2B fazem referência específica a uma substância criogênica de nitrogênio, mas isto não é intencionado a ser limitante. A invenção no geral pode ser mais usada com qualquer substância criogênica adequada, como será entendido por aqueles de habilidade na técnica; meramente por modo de exemplo, as substâncias criogênicas alternativas que podem ser usadas incluem argônio, hélio, hidrogênio, e oxigênio. Na Figura 2B, a linha de fase líquido-gás é identificada com o rótulo de referência 256 e o caminho termodinâmico seguido pela substância criogênica é identificada com rótulo de referência 258.

Um gerador criogênico 246 é usado para fornecer a substância criogênica em uma pressão que excede a pressão de ponto crítico P_c para a substância criogênica em sua saída, referenciado nas Figuras 2A e 2B por rótulo ¹⁰. O ciclo de resfriamento no geral pode começar em qualquer ponto no diagrama de fase tendo uma pressão de P_c acima ou levemente abaixo, embora seja vantajoso para a pressão estar próxima a pressão de ponto crítico P_e . A eficiência de resfriamento do processo descrito aqui no geral é maior quando a pressão inicial está próxima a pressão de ponto crítico P_e de modo que em pressões mais altas podem haver requerimentos de energia aumentados para obter o fluxo desejado. Assim, as modalidades podem as vezes incorporar várias pressões limite superiores mais altas, mas no geral começam próximas do ponto crítico, tal como entre o 0,8 e 1,2 vezes P_c , e em uma modalidade em cerca de 0,85 vezes P_e . Diferentes modalidades podem ter a maior pressão da substância criogênica inicial do que cerca de 0,8 vezes sua pressão de ponto crítico, mas menor do que 5,0 vezes P_c , menor do que 2,0 vezes P_c , menor do que 1,5 vezes P_c , menor do que 1,2 vezes P_c , menor do que 1,1 vezes P_c , menor do que 1,01 vezes P_c , ou menor do que 1,001 vezes P_c . Também, em várias modalidades, é vantajoso para a temperatura inicial da substância criogênica estar em ou próxima a temperatura de ponto crítico T° de modo que em diferentes modalidades a temperatura inicial é $T^\circ \pm 50^\circ\text{C}$, é $T^\circ \pm 25^\circ\text{C}$, é $TT \pm 10^\circ\text{C}$, é $TT \pm 5^\circ\text{C}$, é $T^\circ \pm$

1°C, é $TT \pm 0,1^\circ\text{C}$, ou é substancialmente igual a T .

A substância criogênica é fluxada através de um tubo, pelo menos parte do que é envolvido por um reservatório 240 da substância criogênica em um estado líquido, reduzindo sua temperatura sem substancialmente mudar sua pressão. Na Figura 2A, o reservatório é mostrado como líquido N_2 , com um trocador de calor 242 fornecido dentro do reservatório 240 para extrair o calor da substância criogênica fluindo. Fora do reservatório 240, o isolamento térmico 220 pode ser fornecido ao redor do tubo para impedir o aquecimento indesejado da substância criogênica conforme ela é fluxada do gerador de substância criogênica 246. No ponto 2 , depois de ser resfriado por e ser levado em contato térmico com a substância criogênica líquida, a substância criogênica tem uma temperatura mais baixa mas é na pressão substancialmente inicial. Em alguns exemplos, pode haver uma mudança de pressão, como é indicado na Figura 2B na forma de uma diminuição de pressão insignificante, contanto que a pressão não caia substancialmente abaixo da pressão de ponto crítico P_c , isto é não caia abaixo da pressão mínima determinada. No exemplo mostrado na Figura 2B, a queda da temperatura como um resultado do fluxo através da substância criogênica líquida é cerca de 47°C .

A substância criogênica é depois fornecida a um dispositivo para o uso em aplicações criogênicas. Na modalidade exemplar mostrada na Figura 2A, a substância criogênica é fornecida a uma entrada 236 de uma criossonda 224, tal como pode ser usada em aplicações criogênicas medicinais, mas este não é uma necessidade. No ponto quando a substância criogênica é fornecida a um tal dispositivo, indicado pelo rótulo 3 nas Figuras 2A e 2B, pode haver uma mudança insignificante na pressão e/ou temperatura da substância criogênica conforme ela move-se através de uma interface com o dispositivo, isto é, tal como quando ela é fornecida do tubo à entrada da criossonda 236 na Figura 2A. Tais mudanças podem tipicamente mostrar um aumento insignificante na temperatura e uma diminuição insignificante na pressão. Fornecido a pressão da substância criogênica permanece acima da pressão mínima determinada (e condições associadas), o aumento insignifi-

cante na temperatura não afeta significativamente o desempenho porque a substância criogênica simplesmente move-se de volta em direção ao ponto crítico sem encontrar a linha de fase líquido-gás 256, desse modo evitando o bloqueio de vapor.

- 5 O isolamento térmico ao longo do eixo das agulhas de crioterapia, e ao longo do sistema de suporte que libera a capacidade de congelamento aproximadamente crítica para estas agulhas, pode usar um vácuo melhor do que uma parte por milhão da pressão atmosférica. Um tal vácuo pode não ser atingido por bombas de vácuo parcial de estágio duplo convencionais sozinhas. O sistema de crioterapia percutâneo em uma modalidade assim incorpora um método simplificado de bombeamento por absorção ao invés de usar bombas de alto vácuo caras e de manutenção intensiva, tal como bombas de difusão ou bombas turbomoleculares. Isto pode ser feito em um reservatório de sistema interno de carvão vegetal, assim como
- 10 sendo construído em cada uma sonda *descartável* individual.

- 15 As modalidades do sistema incorporam um método de bombeamento por absorção em que o banho de nitrogênio líquido que é usado para sub-resfriar a corrente de chegada de nitrogênio próxima a seu ponto crítico também é usada para resfriar um pequeno volume de carvão vegetal limpo.
- 20 A área de superfície vasta do carvão vegetal permite absorver a maior parte de átomos de gás residual, assim abaixando a pressão ambiente dentro de seu volume para bem abaixo do vácuo que é usado para isolar termicamente o eixo da agulha e o hardware de suporte associado. Este volume que contém o carvão vegetal frio é fixado através da tubulação de diâmetro pequeno
- 25 ao espaço que isola o fluxo da substância criogênica aproximadamente crítico a agulhas. Dependendo dos requerimentos do projeto do sistema para cada uso clínico, o carvão vegetal pode ser incorporado no reservatório de resfriamento da substância criogênica líquida 240 ver na Figura 2A, ou tornar-se parte da criossonda 224, próxima da conexão da mangueira de extensão próxima da entrada 236. As fixações podem ser feitas através de
- 30 uma montagem de baioneta de contração térmica ao espaço de vácuo entre o eixo externo das agulhas encamisadas a vácuo e os capilares internos que

transportam a substância criogênica aproximadamente crítica, e que é termicamente isolada do tecido adjacente. Desta maneira, a escalabilidade do sistema estende-se de construções de projetos simples, por meio do qual o conceito carvão vegetal de vácuo pode ser incorporado em reservatórios menores onde podem ser mais convenientes para tirar o vácuo. Alternativamente, pode ser desejável para sistemas de múltiplas sondas para individualmente incorporar pacotes de carvão vegetal pequenos em cada criossonda próxima à junção do fim da extensão/criossonda com a interface da máquina 236, tal que cada mangueira e criossonda tira seu vácuo próprio, desse modo reduzindo ainda os custos de construção.

O fluxo da substância criogênica do gerador de substância criogênica 246 através da criossonda 224 ou outro dispositivo é controlado na modalidade ilustrada com uma montagem que inclui uma válvula de craqueamento 216, uma impedância de fluxo, e um controlador de fluxo. A criossonda 224 por si só pode compreender uma camisa a vácuo 232 ao longo seu comprimento e pode ter uma ponta fria 228 que é usada para as aplicações criogênicas. Diferentemente de uma sonda Joule-Thomson, onde a pressão da substância criogênica trabalhando muda significativamente na ponta de sonda, estas modalidades da invenção fornecem relativamente pouca mudança na pressão por toda a sonda. Assim, no ponto ³, a temperatura da substância criogênica tem aumentado aproximadamente à temperatura ambiente, mas a pressão permanece elevada. Mantendo-se a pressão acima da pressão de ponto crítico P , por todo o processo, a linha de fase líquido-gás 256 nunca é encontrada ao longo do caminho termodinâmico 258 e o bloqueio de vapor desse modo é evitado. A pressão da substância criogênica retorna à pressão ambiente no ponto antes de passar através do controlador de fluxo 208, que está tipicamente localizado bem longe da criossonda 224. A substância criogênica depois pode ser ventilada através de ventilação 204 em condições substancialmente ambientes.

Um método para resfriar em uma modalidade em que a substância criogênica segue o caminho termodinâmico mostrado na Figura 2B é ilustrado com o diagrama de fluxo da Figura 3. No bloco 310, a substância crio-

gênica é gerada com uma pressão que excede a pressão de ponto crítico e está próxima à temperatura de ponto crítico. A temperatura da substância criogênica gerada é abaixada no bloco 314 através de troca de calor com uma substância tendo uma temperatura mais baixa. Em alguns exemplos, esta convenientemente pode ser realizada usando-se troca de calor com um estado líquido em pressão ambiente da substância criogênica, embora a troca de calor pode ser realizada sob outras condições em diferentes modalidades. Por exemplo, uma substância criogênica diferente pode ser usada em algumas modalidades, tal como fornecendo-se troca de calor com nitrogênio líquido quando o fluido de trabalho é o argônio. Também, em outras modalidades alternativas, a troca de calor pode ser realizada com uma substância criogênica que está em uma pressão que difere da pressão ambiente, tal como fornecendo-se a substância criogênica em pressão mais baixa para criar um ambiente mais frio.

15 A substância criogênica resfriada ainda é fornecida no bloco 318 para um dispositivo de aplicação criogênica, que pode ser usado para uma aplicação de resfriamento no bloco 322. A aplicação de resfriamento pode compreender resfriar e/ou congelar, dependendo de se um objeto é congelado com a aplicação de resfriamento. A temperatura da substância criogênica é aumentada como um resultado da aplicação da substância criogênica, e a substância criogênica aquecida é fluxada a um console de controle no bloco 326. Embora possa haver alguma variação, a pressão da substância criogênica no geral é mantida maior do que a pressão de ponto crítico por todos os blocos de 310 a 326; a mudança principal nas propriedades termodinâmicas da substância criogênica nestes estágios é sua temperatura. No bloco 330, a pressão da substância criogênica aquecida depois é deixada cair até a pressão ambiente de modo que a substância criogênica possa ser ventilada, ou reciclada, no bloco 334. Em outras modalidades, a substância criogênica pressurizada remanescente no bloco 326 também pode retornar ao longo de um caminho ao bloco 310 para reciclar ao invés de ventilar a substância criogênica na pressão ambiente.

30

Existe uma variedade de projetos diferentes que podem ser usa-

dos para o gerador de substância criogênica 246 em fornecer substância criogênica em uma pressão que excede a pressão de ponto crítico, ou satisfaz os critérios de fluxo aproximadamente críticos, para fornecer substancialmente fluxo da substância criogênica ininterrupto em uma pressão e temperatura próxima de seu ponto crítico. Na descrição dos exemplos de tais projetos, o nitrogênio é novamente debatido para propósitos de ilustração, será entendido que as substâncias criogênicas alternativas podem ser usadas em várias modalidades alternativas. A Figura 4 fornece uma ilustração esquemática de uma estrutura que pode ser usada em uma modalidade para o gerador de substância criogênica. Um tanque termicamente isolado 416 tem uma válvula de entrada 408 que pode ser aberta para encher o tanque 416 com substância criogênica líquida ambiente. Um elemento de aquecimento resistente 420 está localizado dentro do tanque 416, tal como em uma seção de fundo do tanque 416, e é usado para aquecer a substância criogênica quando a válvula de entrada é fechada. O calor é aplicado até que o ponto de operação desejado seja atingido, isto é em uma pressão que excede os critérios de fluxo aproximadamente críticos. Uma válvula de craqueamento 404 é fixada a uma saída do tanque 416 e ajustada à abertura na pressão desejada. Em uma modalidade que usa o nitrogênio como uma substância criogênica, por exemplo, a válvula de craqueamento 404 é ajustada à abertura em uma pressão de cerca de 33,9 bar, cerca de 1 bar maior do que a pressão de ponto crítico. Uma vez que a válvula de craqueamento 404 abre, um fluxo de substância criogênica é estocado ao sistema como descrito na conexão com nas Figuras 2A e 2B acima.

25 Um disco de ruptura 412 também pode ser fornecido consistente com práticas de engenharia segura para acomodar a pressões da substância criogênica altas que podem ser geradas. A extensão dos componentes de segurança também podem depender da parte na qual a substância criogênica deve ser usada visto que elas têm pontos críticos diferentes. Em alguns exemplos, um maior número de discos de ruptura e/ou válvulas de retenção podem ser instalados para aliviar as pressões antes delas alcançarem os limites de projeto do tanque 416 no evento que desenvolve proces-

sos descontrolados.

Durante a operação típica do gerador de substância criogênica, um controlador de realimentação eletrônico mantém corrente através do aquecedor resistente 420 a um nível suficiente para produzir uma taxa de fluxo desejada de substância criogênica de alta pressão no sistema. O fluxo real da substância criogênica fora do sistema pode ser controlado por um controlador de fluxo mecânico 208 no final do caminho de fluxo como indicado em relação a Figura 2A. A quantidade de energia térmica necessária para alcançar as pressões da substância criogênica desejadas é tipicamente constante uma vez que a válvula de entrada 408 foi fechada. A energia dissipada no aquecedor resistente 420 pode depois ser ajustada para ter controle positivo no controlador de fluxo mecânico 208. Em uma modalidade alternativa, o controlador de fluxo mecânico 208 é substituído com o controlador do aquecedor para o gerador de substância criogênica. Em uma tal modalidade, uma vez que a válvula de craqueamento 404 abre e a substância criogênica de alta pressão é libertada para o resto do sistema, o controlador de realimentação continuamente ajusta a corrente através do aquecedor resistente para manter um taxa desejada de fluxo de substância criogênica gasosa fora do sistema. O controlador de realimentação pode assim compreender um elemento computacional para que o suprimento de corrente do aquecedor e do controlador de fluxo sejam conectados por meio de interface.

Em uma outra modalidade, uma pluralidade de geradores de substância criogênica podem ser usados para fornecer fluxo aumentado para aplicações específicas. Uma tal modalidade é ilustrada na Figura 5 para uma modalidade que usa dois geradores de substância criogênica 512, embora é evidente que um número maior pode ser usado ainda em outras modalidades. A pluralidade de geradores de substância criogênica 512 é montada dentro de um Dewar de substância criogênica na pressão ambiente 502 que contém um volume de substância criogênica de pressão ambiente 516. A substância criogênica aproximadamente crítica gerada com os geradores de substância criogênica 512 é fornecida a um trocador de calor 508 que

resfria a substância criogênica na mesma maneira como descrito com respeito ao trocador de calor 242 da Figura 2A. Uma válvula de craqueamento 504 associada com cada um dos geradores de substância criogênica 512 permite a substância criogênica sub-resfriado de alta pressão (isto é, resfriado abaixo da temperatura crítica) para ser fornecida aos dispositivos de aplicação de substância criogênica ao longo do tubo 420.

Em uma modalidade específica, cada um dos geradores de substância criogênica tem no geral uma forma cilíndrica com um diâmetro interno de cerca de 30 cm e uma altura interna de cerca de 1,5 m para fornecer um volume interno de cerca de um litro. Os geradores de substância criogênica convenientemente podem ser empilhados, com cada gerador de substância criogênica tendo sua própria camisa isolante independente e aquecedor interno como descrito em relação à Figura 4. Uma espiral de tubulação pode ser enrolada ao redor do diâmetro externo dos geradores de substância criogênica empilhados, com o fluxo de saída da substância criogênica de alta pressão de cada gerador de substância criogênica que passa através de uma respectiva válvula de retenção antes de entrar no lado de entrada do trocador de calor da tubulação em espiral. Uma saída do trocador de calor em espiral pode vantajosamente ser encamisados a vácuo ou de outro modo isolado para evitar o aquecimento da substância criogênica de alta pressão conforme ela flui em direção ao objeto sendo resfriado. Uma tal pilha de geradores de substância criogênica e o trocador de calor em espiral externa pode ser montado em direção ao fundo de um substância criogênica líquida de Dewar, tal como um padrão Dewar que retém cerca de 40 litros de líquido N_2 quando cheio. Este Dewar também pode ser equipado com um mecanismo conveniente para encher o Dewar com a substância criogênica líquida e para ventilar a regaseificação ("boil-off") do Dewar. Em alguns exemplos, a substância criogênica líquida é mantida em ou pressão ambiente próxima, mas pode alternativamente ser fornecida em uma pressão diferente. Por exemplo, a substância criogênica líquida pode ser fornecida em uma pressão mais baixa para criar uma temperatura de banho da substância criogênica líquida ambiente mais fria. No caso de líquido N_2 , por exemplo, a

pressão pode ser diminuída a cerca de 98 torr para fornecer a substância criogênica na temperatura do gelo parcialmente derretido do N_2 líquido de cerca de 63 K (-210,15°C). Embora uma tal modalidade tem a vantagem de fornece mesmo temperaturas mais baixas, podem haver complexidades de engenharia adicionais em operar a substância criogênica líquida de Dewar abaixo da pressão ambiente.

A operação das modalidades do gerador de substância criogênica múltipla pode vantajosamente ser configurada para fornecer um suprimento substancialmente contínuo de substância criogênica de alta pressão ao dispositivo criogênico. A substância criogênica líquida ambiente 516 é usada como um suprimento para um gerador de substância criogênica suprimido 512, com o gerador de substância criogênica suprimido 512 sendo enchido novamente conforme um outro dos geradores de substância criogênica 512 é usado para fornecer alta pressão ou substância criogênica aproximadamente crítica. Assim, o exemplo na Figura 5 com dois geradores de substância criogênica é mostrado em um estado operacional onde o primeiro dos geradores de substância criogênica 512-1 foi suprimido e está sendo enchido novamente com a substância criogênica líquida ambiente 516 operando-se sua válvula de entrada para fornecer o fluxo 520. Ao mesmo tempo, o segundo gerador de substância criogênica 512-2 tem um volume de substância criogênica líquida que está sendo aquecido como descrito de modo que a substância criogênica está sendo liberada como substância criogênica aproximadamente crítica através de sua saída válvula de craqueamento 504. Quando o segundo gerador de substância criogênica 512-2 esvazia, a válvula de enchimento do primeiro gerador de substância criogênica 512-1 será fechada e seu aquecedor levado à energia total para levá-lo ao ponto onde ele fornece a substância criogênica aproximadamente crítica através de sua válvula de retenção. A válvula de entrada do segundo gerador de substância criogênica 512-2 é aberta de modo que ela possa encaixar em um processo de reenchimento, os dois geradores de substância criogênica 512 desse modo tendo funções trocadas a partir do que é representado na Figura 5.

Os dois geradores de substância criogênica 512 operam fora da fase neste modo até que o inteiro Dewar 502 da substância criogênica líquida ambiente é suprimida, fornecendo um fluxo substancialmente contínuo da substância criogênica aproximadamente crítica aos dispositivos de aplicação

5 criogênica até aquele momento. O sistema assim é vantajosamente escalável para reunir aproximadamente qualquer aplicação intencionada. Por exemplo, para uma aplicação definida por um tempo de resfriamento total e uma taxa em que a substância criogênica é consumida fornecendo-se um Dewar de tamanho apropriado para acomodar a aplicação. Como será nota-

10 do mais tarde, a capacidade de resfriamento do N_2 líquido aproximadamente crítico que permite o consumo eficiente da substância criogênica durante tempos de operação máximos e de escala de geradores de substância criogênica aproximadamente críticos para os requerimentos do tempo de congelamento total ditados pelas necessidades de aplicação específicas. Por exemplo,

15 os inventores têm calculado que aplicações de congelamento criogênico medicinais podem usar criossondas aproximadamente críticas que consomem cerca de dois litros de N_2 líquido ambiente por instrumento por hora.

O consumo de substância criogênica para o uso de sonda múltipla fornece uma demonstração da eficiência relativa de sistemas de N_2 líquido aproximadamente críticos comparados às unidades de base JT com seus tanques associados grandes, levando ao tamanho funcional muito menor da configuração do sistema total. Especialmente, dados de testes reunidos pelos inventores sugerem que um N_2 líquido aproximadamente crítico de 1,6-

20 mm e criossonda de 1,6-mm geram bolas de gelo de até 4 cm de diâmetro dentro de fantasmas de gelatina, similar a JT de 2,4-mm com base em criossondas de argônio corrente. Com base em testes realizados pelos inventores, acredita-se que 10 criossondas de N_2 líquido aproximadamente críticas

25 podem produzir um volume de congelamento comprável para não menos do que seis JT com base em criossondas de argônio. Isto permite uma demonstração clara dos conteúdos do sistema apropriado para a idade de uso da próstata correntemente aceita de até três casos por dia. A corrente das cri-

30

ossondas de 2,4-mm utilizam até 0,28 mPa/min (40 PSU/min), desse modo rendendo não mais do que 80 minutos do tempo de congelamento total durante uma única sonda de um único tanque de argônio cheio (isto é, não mais do que 22,0 mPa de pressão utilizável dentro de um tanque de argônio de 41,3 mPa cheio). Portanto, pelo menos dois destes tanques de argônio (máximo de 160 minutos) no geral são usados durante cada caso de próstata, que usualmente requer pelo menos seis criossondas de 2,4-mm operando durante dois ciclos de congelamento separados, o primeiro usualmente de 15 minutos e o segundo usualmente de 10 minutos (isto é, $(6 \times 15) + (6 \times 10) = 150$ tempo de congelamento total em minutos por sonda). Além disso, um tanque de hélio que contém 2000 PSI também é usado para cada caso de próstata e o tanque é de tamanho e peso similar aos tanques de argônio. Combinando os 80 kg (175 lbs), 0,38-m³ na caixa de sistema Endocare (isto é, dimensões = 125 x 48 x 64 cm³) com os nove tanques (três para cada caso) cada um pesando 182 kg (1638 kg total) e cada um deslocando quantidades de 0,062 m³ ($n \times 12 \text{ cm}^2 \times 137 \text{ cm} \times 9 = 0,56 \text{ m}^3$ total) para um peso do sistema total de 1718 kp (isto é, 3780 lbs ou 1,9 tons) dentro de um volume de 0,94-m³.

Para o sistema de N₂ líquido aproximadamente crítico, mesmo dez criossondas em paralelo durante 75 minutos (isto é, 25 minutos para cada um caso) pode ser assim acomodado por um Dewar de 25-litro (10 sondas x 2 L/(sonda hora) x 1,25 hora). Um tal Dewar de 25-litro pode medir aproximadamente 30 cm no diâmetro e 1,0 metro em altura (isto é, volume exterior de 0,07 m³ contendo um reservatório interno isolado de 20-cm de diâmetro e 0,75 metros em altura, mantendo o volume de 25-litros). Este Dewar cheio pode pesar até 40 kg (isto é, 20-kg do peso do Dewar + 20 kg para 25 litros de N₂ líquido em 0,81 g/cm³) e pode ser pelo menos parcialmente contido dentro das dimensões da caixa Endocare relativamente vazia. Um sistema independente aproximadamente crítico fornecido pelas modalidades da invenção pode assim pesar menos do que 120 kp (isto é, 80-kg da caixa + os 40-kg do Dewar cheio) e ocupar um espaço de menos do que 0,40 m³ (isto é, 03,7 + 0,07/2 m³). Portanto, o seguinte gráfico de escala for-

nece uma comparação do desempenho do sistema em relação ao área de cobertura clínica prática dentro de um suíte cirúrgica ou radiológica. Para uma modalidade portátil medindo aproximadamente 25 cm no comprimento, 50 cm no diâmetro, e contendo 100 mL de N₂ líquido que pode ser conduzido em taxas variáveis para tempos de congelamento dermatológico ou intersticial limitado:

Tipo	Tempo de Congelamento Total (min)	Peso (kg)	Volume (m ³)	Caso	Tanques
JT-Argônio	25	626	0,56	1 próstata	2 Ar + 1 He
JT-Argônio	75	1718	0,94	3 próstatas	2 Ar + 1 He
NC-LN ₂	75	120	0,40	3 próstatas	nenhum
NC-LN ₂	5 a 20	1	0,0005	1 US-guiado	sonda única

Em resumo, um sistema de nitrogênio líquido aproximadamente crítico pode realizar um número total de casos clínicos tratados em um determinado período com menos do que metade da necessidade de espaço clínico e uma ordem de peso total mais baixo de magnitude que necessita ser mudada continuamente por técnicos em configuração, comparado aos sistemas com base em JT correntes. A quantificação de custos de produção mais baixos é complicada pela existência de diferenças de custo regionais, mas é observado que correntemente os custos para os sistemas com base em JT incluem um custo não reembolsável médio de cerca de \$ 200/caixa para gases comprimidos. A quantificação das necessidades de peso e espaço também não é responsável pelo tempo de trabalho e impactos de segurança de conjunto de funcionários hospitalares tendo que mover, conectar, e segurar os tanques de alta pressão.

Algumas modalidades da invenção são especialmente adequadas para aplicações criogênicas de curta duração de baixo volume e são fornecidas na forma de um instrumento portátil independente, um exemplo do qual é mostrado com a fotografia da Figura 6. O instrumento portátil integrado é especialmente adequado para o uso em aplicações envolvendo um resfriamento criogênico relativamente breve, tal como aplicações de congelamento de baixo volume em dermatologia e intersticiais (por exemplo, tra-

tamento de fibroadenomas de mama, desenvolvimento de crio-imunoterapia). A estrutura de um tal instrumento é substancialmente como descrito em relação à Figura 2A, com os componentes fornecidos como uma unidade independente pequena. Em particular, um gerador de substância criogênica

5 relativamente pequeno 604 é conectado em série com um tanque de substância criogênica líquida ambiente pequeno 608, e um dispositivo criogênico montado 612. No exemplo mostrado na Figura 6, o dispositivo criogênico é um dispositivo criocirúrgico que é permanentemente montado ao instrumento, embora outros tipos de dispositivos criogênicos possam ser usados em

10 modalidades diferentes. O instrumento portátil independente pode ser fornecido como um instrumento de uso único descartável ou pode ser recarregável com substância criogênica líquida em modalidades diferentes. O gerador de substância criogênica 604 e o tanque de substância criogênica líquida ambiente 608 são encamisados a vácuo ou de outro modo termicamente

15 isolados de seu ambiente adjacente e entre si. Para a conveniência de exibição, o instrumento mostrado na Figura 6 foi fotografado com um tubo externo que mantém o gerador de substância criogênica 604 e o tanque de substância criogênica líquida 608 sob vácuo removidos.

Para ser usado, um interruptor é fornecido que permite que um

20 operador controle um aquecedor pequeno no gerador de substância criogênica. A ativação do aquecedor resulta em um fluxo de substância criogênica aproximadamente crítica através de impedâncias de fluxo estabelecidas que podem ser adaptadas para uma tarefa de resfriamento particular como descrito acima. O fluxo da substância criogênica aproximadamente crítica pode

25 continuar até que um reservatório de tal substância criogênica dentro do instrumento seja consumido, depois de que o instrumento pode ser disposto de ou recarregado para o uso futuro. Em algumas modalidades, tal como para o resfriamento de produtos eletrônicos receptores sensíveis, a unidade portátil pode conectar por meio de interface com o objeto sendo resfriado através de

30 uma porta interconectada de autovedação. Isto permite que o objeto seja resfriado para ser desconectado do instrumento descartável ou recarregável entre os usos.

As modalidades de instrumento portátil podem ser consideradas ser parte da seqüência contínua de escalabilidade permitida pela invenção. Em particular, não existe apenas a opção de fornecer substância criogênica aproximadamente crítica ou de alta pressão suficiente para os usos clínicos de alto volume ou outros, mas também para os usos de baixo volume de curta duração. Sobre a faixa total desta seqüência contínua, a operação é possível com tamanhos do dispositivo criogênico muito pequenos, isto é menos do que 1 mm, porque não existe nenhuma barreira apresentada pelo fenômeno de bloqueio de vapor. Por exemplo, a capacidade para operar com tamanhos pequenos de dispositivo permite um arranjo realístico em que cartuchos de substância criogênica líquida recarregáveis ou descartáveis pequenos são fornecidos como um suprimento, removendo a necessidade por sistemas criogênicos grandes, inconvenientes. Por exemplo, no contexto de uma aplicação médica tal como em um ambiente clínico para a ablação de nervo, ou tratamento da dor, um Dewar de mesa pequeno de N₂ líquido pode ser usado para fornecer N₂ líquido para encher novamente cartuchos múltiplos conforme necessário para a ablação de nervo. Para um volume típico em um tal ambiente clínico, o Dewar de mesa requereria carregamento talvez uma vez por semana para fornecer líquido o suficiente para encher novamente os cartuchos para o uso nesta semana. Benefícios similares podem ser compreendidos com modalidades da invenção em ambientes industriais, tais como onde o resfriamento a curto prazo é fornecido usando-se cartuchos descartáveis conforme necessário. Uma acomodação menor para tais aplicações forneceria precauções de ventilação apropriadas para a quantidade muito pequena de aregaisificação ("boil-off") que é provável ocorrer, mesmo com cartuchos bem isolados e/ou pressurizados. As modalidades da invenção assim permitem um escopo realçado de opções de resfriamento criogênico para numerosos tipos de aplicações.

Uma outra modalidade usa a geração de substância criogênica aproximadamente crítica para a pulverização direta tanto para aplicações médicas (por exemplo, dermatologia, e como uma ferramenta de auxílio cirúrgico intra-operativa durante qualquer resseção de tumor) quanto não mé-

dicas. Os dispensadores de LN_2 correntes para a dermatologia dependem da ebulição espontânea de N_2 líquido através de um bocal de furo de alfinete, produzindo dispensação lenta e relativamente inexata da substância criogênica, isto é, ele eficazmente respinga através do furo muito pequeno. Além disso, a incapacidade para controlar precisamente as margens de congelamento resulta na destruição mais ampla de lesões cutâneas com dano colateral associado de tecido cutâneo normal adjacente. A liberação ejetada também faz aplicação de N_2 próximo às estruturas cruciais, tais como depósitos de gordura pequenos ao redor dos olhos, mais perigosos e no geral evitados. A Figura 7A mostra um tubo provido de energia a bateria 702 com uma bateria pequena 704 colocada ao longo um suporte do tubo 702. A bateria 704 conduz a corrente elétrica ao longo de fios elétricos 706 a uma configuração em espiral 708 no fundo do tubo. O tubo pode ser enchido com nitrogênio líquido 710 e a tampa 712 substituída. Quando a tampa 712 faz uma vedação firme, uma corrente de energia baixa flui para o espiral 708 para gerar pressões de N_2 críticas (por exemplo, $> 4,13 \text{ mPa}$ (600 psi)). O sistema agora está em um estado carregado e pronto para o uso, ventilando a pressão em excesso (por exemplo $> 4,82 \text{ mPa}$ (700 psi)) através de uma válvula calibrada 714. Quando um gatilho 716 é puxado, um controle de energia variável 718 ativa a energia elétrica aumentada para causar a produção de N_2 crítico acelerada durante a pulverização. A ação de puxar o gatilho 716 também ativa a liberação manual de uma válvula de pressão especial 720 que é configurada para fechar automaticamente se a pressão cai abaixo de $4,13 \text{ mPa}$ (600 psi). Neste maneira, apenas o N_2 crítico é liberado através do mecanismo da ponta, evitando o bloqueio e/ou excitação de vapor. De modo a obter uma pulverização precisa mas potente, uma ponta tipo ponta de lápis 722 pode ser fornecida para permitir o controle fino pelo clínico.

As aplicações diretas na pele, ou intraoperativa de N_2 crítico podem ser controladas ainda pela aplicação de uma ponta em cone ventilada 724. Por exemplo, esta ponta 724 pode ser fornecida como um item descartável, de uso único (por exemplo poliuretano) que torna-se rapidamente co-

nectado ao bocal no lugar da ponta tipo ponta de lápis 722. Uma extremidade aberta do cone pode ser fornecida em vários tamanhos variáveis para acomodar uma faixa de lesões muito pequenas a maiores (por exemplo, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, etc. mm). Na operação, a ponta em cone é colocada sobre uma lesão, acomodando tanto lesões exofíticas (por exemplo pólipos cutâneos), assim como de imperfeição (por exemplo manchas de idade). O N_2 crítico move-se ao longo de um tubo de liberação central, enquanto a pulverização refletida ventila-se para fora mais altamente ao longo dos lados do cone. Nesta maneira, apenas a pele/órgão expostos abaixo da ponta em cone que contém a lesão tornam-se tratados e o gás ventilado fica afastado do sítio de tratamento, preservando ainda o tecido colateral.

A Figura 7B ilustra que ainda em uma outra modalidade uma agulha ventilada 730 pode ser colocada como a ponta dispensadora ao invés da ponta tipo ponta de lápis 722 ou o cone ventilado 724. Tais agulhas podem ser aproximadamente de 1 mm em diâmetro externo. O N_2 crítico pode mover-se ao longo de um eixo central 732 a uma câmara 736 dentro da ponta fechada. Para os usos dermatológicos/intra-operativos, o nitrogênio de retorno 734 pode ser ventilado próximo ao eixo da agulha, ou ao longo de um tubo de conexão associado. Uma tal agulha pode não requerer um eixo isolado visto que ela pode ser diretamente colocada em um tumor cutâneo, ou intraoperativo 738, potencialmente congelando ao longo de seu comprimento exposto inteiro.

A termometria também pode desempenhar um papel no tratamento de tumores cutâneos, ou intraoperativos, ajudando a garantir ablação completa de lesões malignas comuns. O carcinoma de célula basal foi observado requerer temperaturas extremamente baixas para a necrose completa, aproximando-se de -160°C . Portanto, um arranjo de termometria com agulha pode ser colocado diretamente abaixo de um tumor usando orientação palpável ou por ultrassom. O congelamento depois pode progredir seguramente até que leituras de termometria uniformes de -160°C sejam atingida por técnica de pulverização direta concentrada, colocação de agulha intersticial, ou sua combinação. A ablação de tumor altamente controlada de mas-

5 sas cutâneas também pode usar uma unidade de mesa, de multissonda que permite o controle por computador do processo de congelamento. Por exemplo, os arranjos de termometria 742 colocados abaixo do tumor permitiriam a realimentação direta às intersticiais crioagulhas 740 colocadas dentro do tumor, bloqueando-as assim que as temperaturas baixas citotóxicas apropriadas fossem atingidas. O clínico que usa uma técnica de pulverização direta, separadamente controlada também pode tratar diretamente os aspectos mais superficiais do tumor.

10 As modalidades da invenção fornecem energia de resfriamento aumentada quando comparada com o resfriamento de substância criogênica de fluxo simples ou com o resfriamento de Joule-Thomson, com uma consequência sendo que a necessidade para tanques de alta pressão múltiplos de substância criogênica é evitada mesmo sem processos de reciclagem. Uma comparação é feita na Figura 8 da energia de resfriamento por mol de substância criogênica para os três sistemas de resfriamento diferentes. A curva de topo corresponde ao ciclo de resfriamento descrito aqui em relação à Figura 2B usando N_2 como a substância criogênica, enquanto que os dois pontos de fundo identificam a energia de resfriamento para os processos de Joule-Thomson que usam argônio e nitrogênio como substâncias criogênicas. Os resultados de Joule-Thomson representam valores máximos para estes processos, porque eles foram determinados para a troca de calor de contrafluxo perfeita; esta troca de calor torna-se muito ineficiente visto que o diâmetro da sonda é reduzido.

25 Os resultados apresentados mencionam que o bloqueio de vapor de N_2 líquido pode ocorrer em pressões mais baixas, mas é evitado na região circular 804 quando o processo satisfaz as condições aproximadamente críticas para as pressões próximas à pressão de ponto crítico para N_2 de 33,94 bar. Como previamente observado, o bloqueio de vapor pode ser evitado em condições de fluxo aproximadamente críticas, embora a eficiência do processo seja melhorado quando a pressão está próxima à pressão de ponto crítico. Os resultados ilustram que os ciclos de resfriamento fornecidos de acordo com as modalidades da invenção são mais do que cinco vezes

tão eficiente quanto os ciclos de Joule-Thomson idealizados. Visto que a eficiência das modalidades que usam pressões acima da pressão de ponto crítico não é substancialmente afetada por mudanças no tamanho da sonda, a energia de resfriamento por grama é freqüentemente mais do que dez vezes maior do que a energia de resfriamento para os ciclos de Joule-Thomson. Esta eficiência maior é manifestada pelo uso de substancialmente menos, isto é $1/5^{\circ}$ a $1/10^{\circ}$, do fluxo de gás de escape, tornando o processo muito mais quieto, menos disruptivo, e sem a necessidade por substituições de tanque múltiplo volumosas.

10 Assim, tendo descrito várias modalidades, será reconhecido por aqueles de habilidade na técnica que várias modificações, construções alternativas, e equivalentes podem ser usados sem divergir do espírito da invenção. Conseqüentemente, a descrição acima não deve ser tomada como limitando o escopo da invenção, que é definido nas reivindicações seguintes.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema para resfriar um objeto com nitrogênio apresentando um ponto crítico definido por uma pressão de ponto crítico e uma temperatura de ponto crítico,

5 sendo o referido sistema, caracterizado pelo fato de que compreende:

 uma pluralidade de geradores de substância criogênica (512-1, 512-2) adaptado para aumentar a pressão de nitrogênio;

 uma pluralidade de válvulas (216, 504), cada uma da referida válvula sendo fornecida em uma saída de uma da pluralidade de geradores de substância criogênica respectiva e adaptada para liberar um fluxo de nitrogênio quando a pressão de nitrogênio dentro de uma da pluralidade de geradores de substância criogênica respectiva excede uma pressão predeterminada, a pressão predeterminada sendo maior do que um valor de pressão determinado para fornecer o nitrogênio em um volume molar reduzido que impede o bloqueio de vapor; cada um do referido gerador de substância criogênica compreendendo um elemento de aquecimento (420) para aplicar calor dentro de um volume interior de um tanque do referido gerador de substância criogênica;

15 um dispositivo de aplicação criogênica (224) adaptado para ser levado em comunicação térmica com o objeto;

 um conduíte (421) em comunicação fluida com cada uma da pluralidade de válvulas para transportar seletivamente o nitrogênio da válvula ao dispositivo de aplicação criogênica de acordo com os estados das válvulas; e

 um controlador de fluxo (208) para regular o fluxo de nitrogênio através do conduíte e dispositivo de aplicação criogênica,

25 sendo que os referidos geradores de substância criogênica, referidas pluralidade de válvulas, e referido controlador de fluxo operam cooperativamente para:

 (a) elevar uma pressão de nitrogênio até entre 0,8 e 1,2 da pressão de ponto crítico do mesmo de 3349 KPa (33,94 bar) e fornecer o nitrogênio em uma temperatura dentro de $\pm 10\%$ da temperatura de ponto crítico do mesmo de $-147,15^{\circ}\text{C}$;

(b) reduzir uma temperatura do nitrogênio sem diminuir a pressão do nitrogênio abaixo de 0,8 vezes a pressão de ponto crítico do mesmo de 3349 KPa (33,94 bar);

5 (c) colocar o nitrogênio em comunicação térmica com o objeto para aumentar a temperatura do nitrogênio a uma temperatura ambiente ao longo de um caminho termodinâmico (258) que mantém uma pressão maior do que 0,8 vezes a pressão de ponto crítico de 3349 KPa (33,94 bar) por uma duração que o nitrogênio e objeto estão em comunicação térmica;

(d) remover o nitrogênio da comunicação térmica com o objeto; e

10 (e) reduzir a pressão do nitrogênio à uma pressão ambiente.

2. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que é operativo para colocar o nitrogênio em comunicação térmica com o nitrogênio líquido apresentando a mesma estrutura química mantida substancialmente à pressão ambiente para reduzir a temperatura do nitrogênio.

15

3. Sistema, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que compreende ainda:

um recipiente (502) mantendo um primeiro banho líquido de nitrogênio, sendo que a referida pluralidade de geradores de substância criogênica (512-1, 512-2) está disposta dentro do referido primeiro banho líquido, cada referido gerador de substância criogênica compreendendo ainda:

20

um tanque termicamente isolado (416) apresentando um volume interior para reter um segundo banho de nitrogênio;

uma entrada (408) para seletivamente receber nitrogênio do referido primeiro banho líquido de nitrogênio.

25

P 10517558

1/8

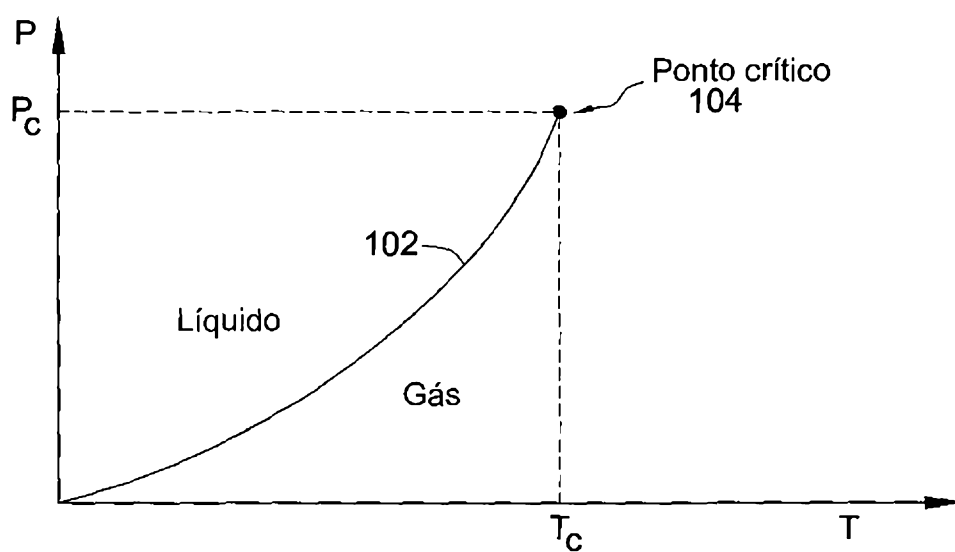


FIG. 1A

P 10517550

2/8

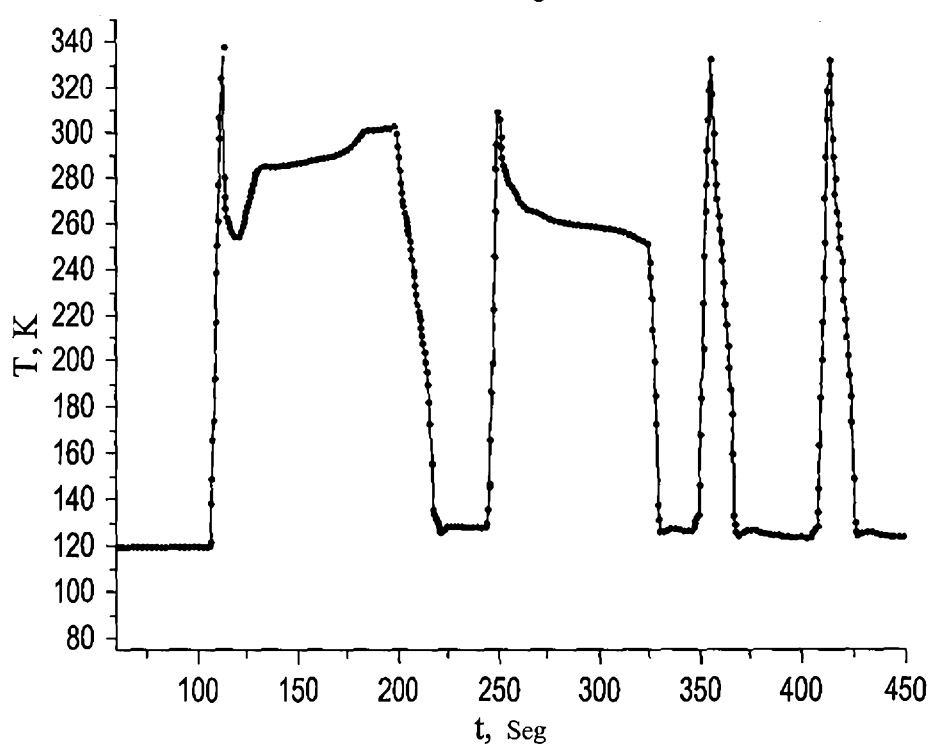
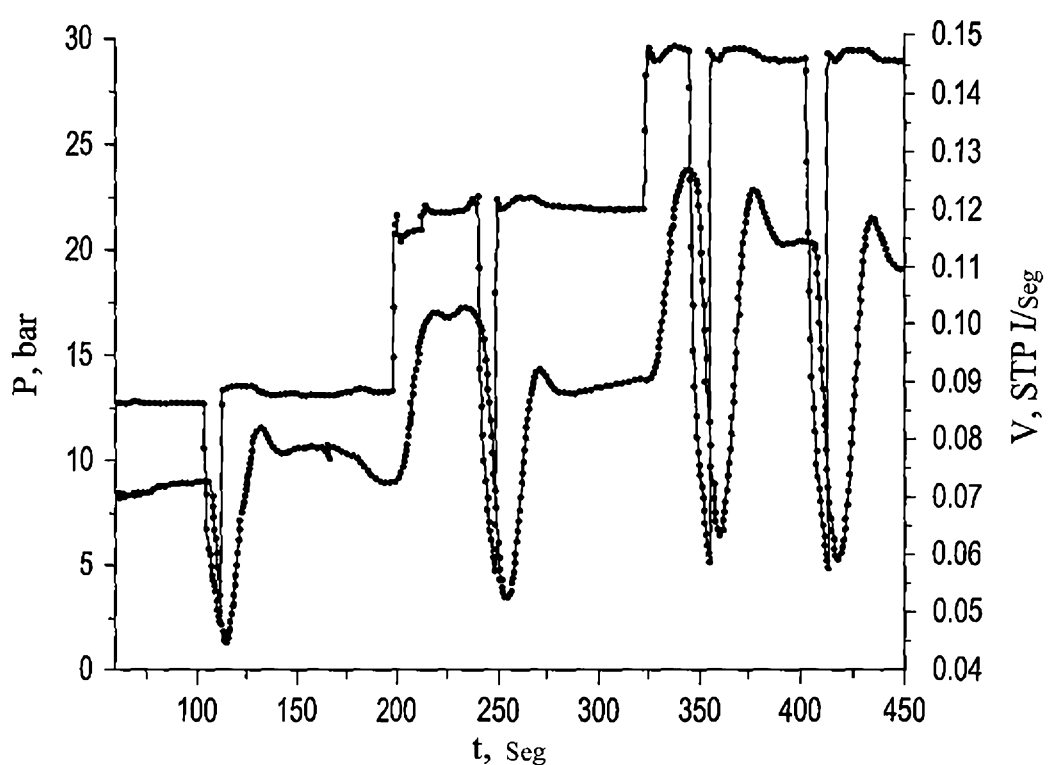


FIG. 1B

P10517550

3/8

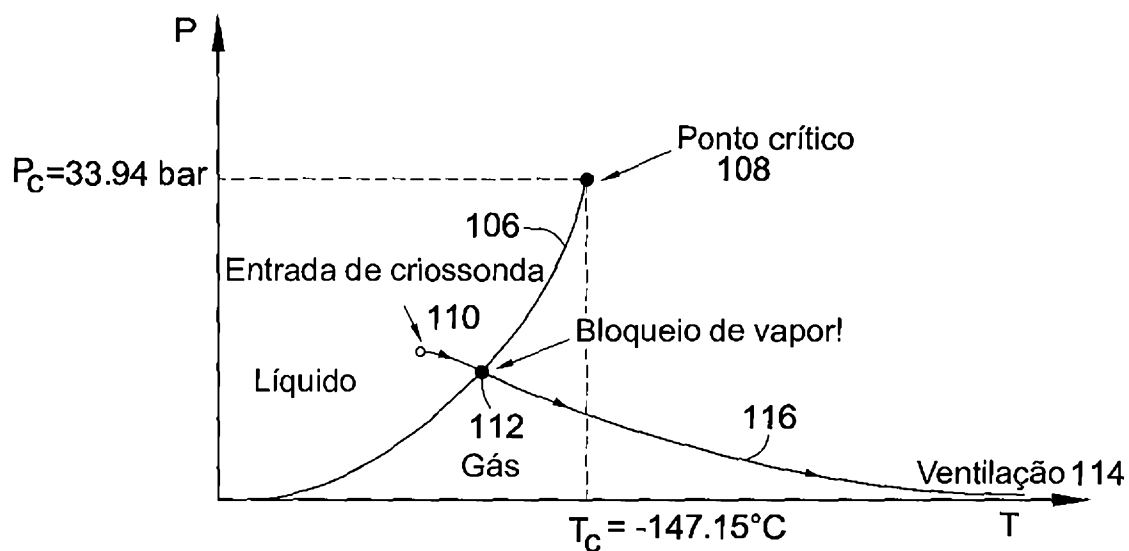


FIG. 1C

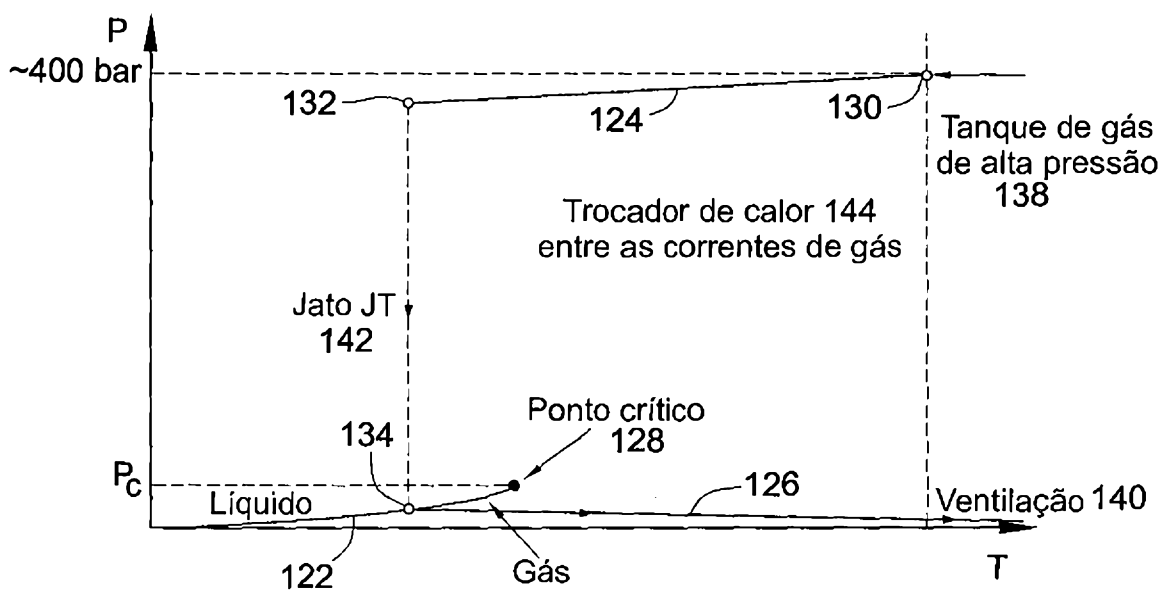


FIG. 1D

P 10517530

4/8

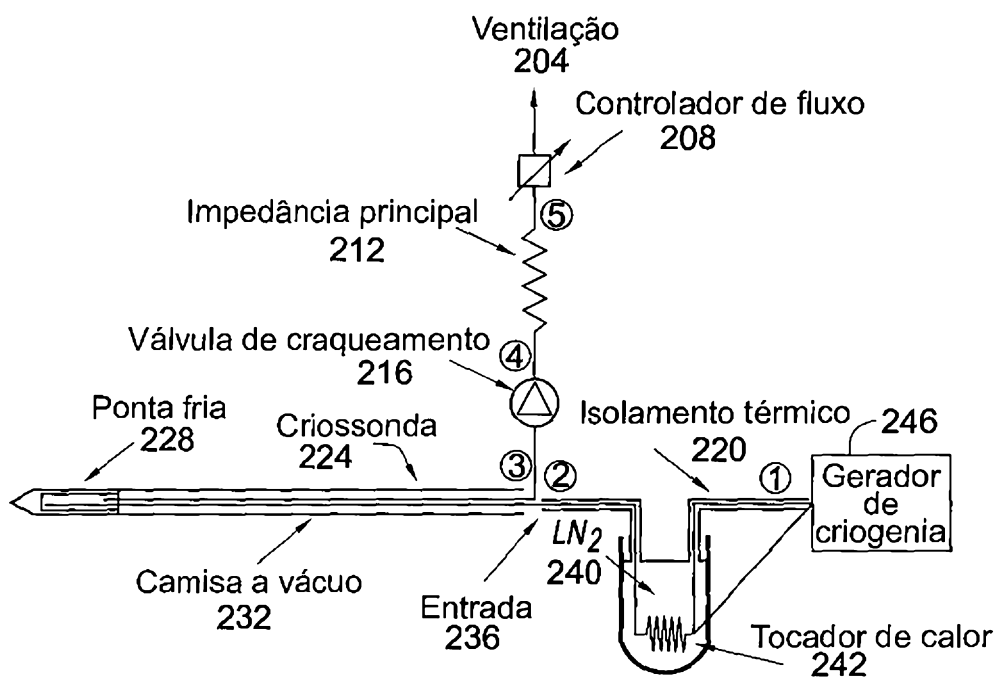


FIG. 2A

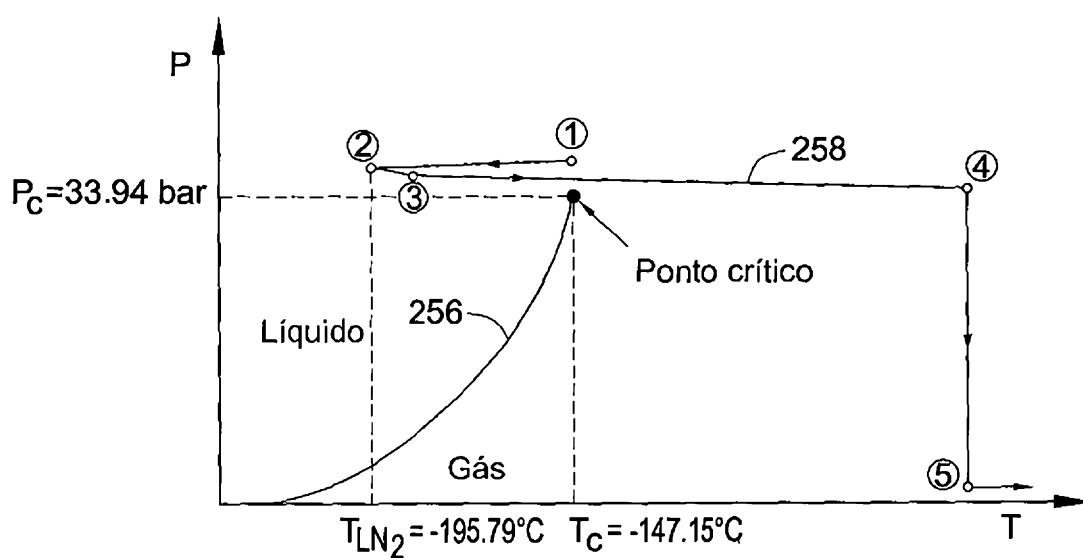


FIG. 2B

P 10517550

5/8

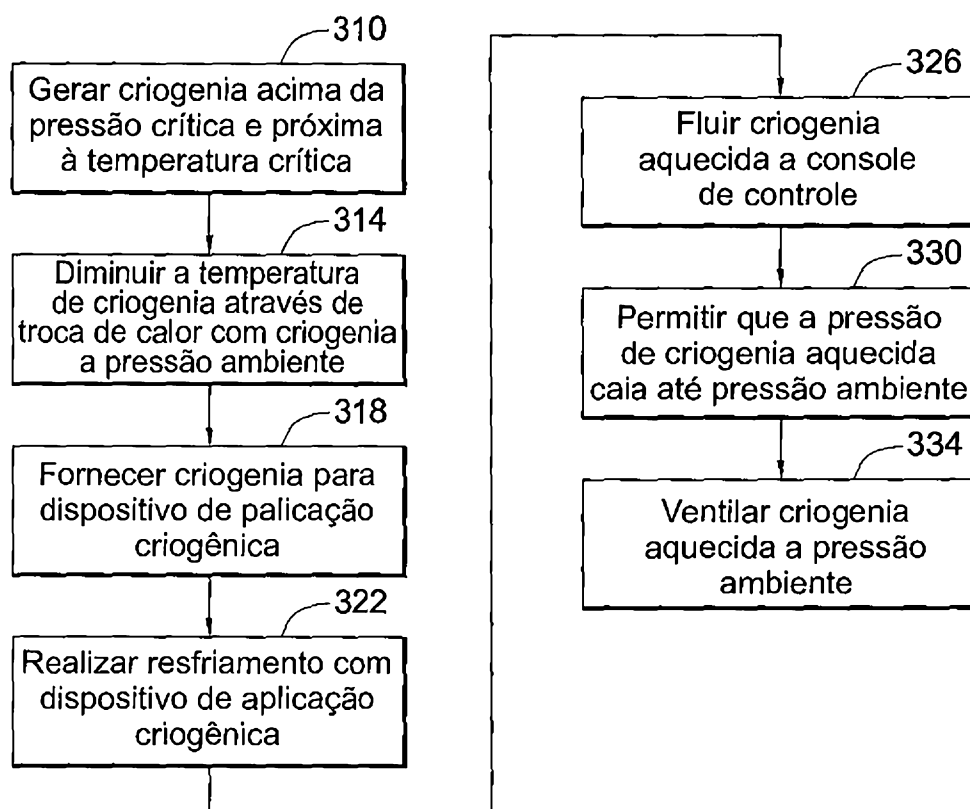


FIG. 3

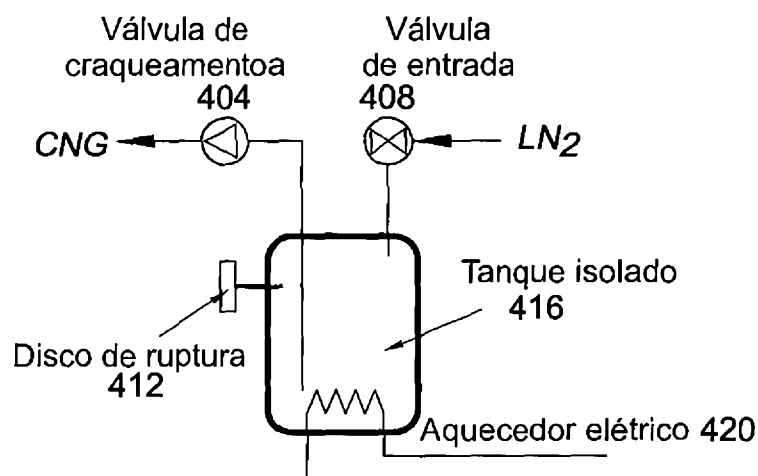


FIG. 4

P 10517550

6/8

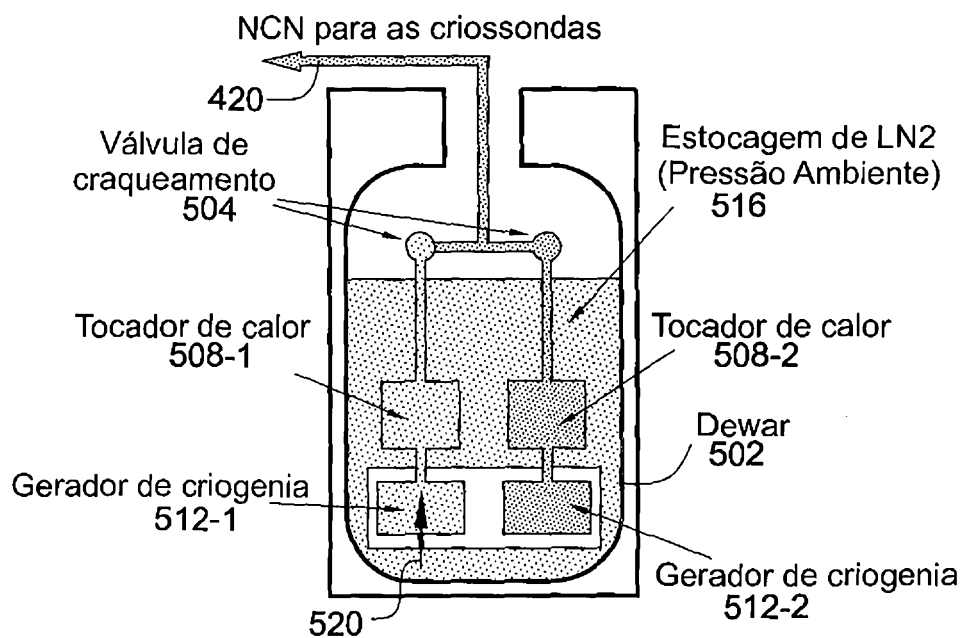


FIG. 5

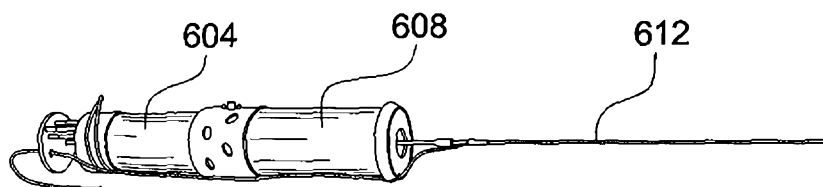


FIG. 6

P 10517850

7/8

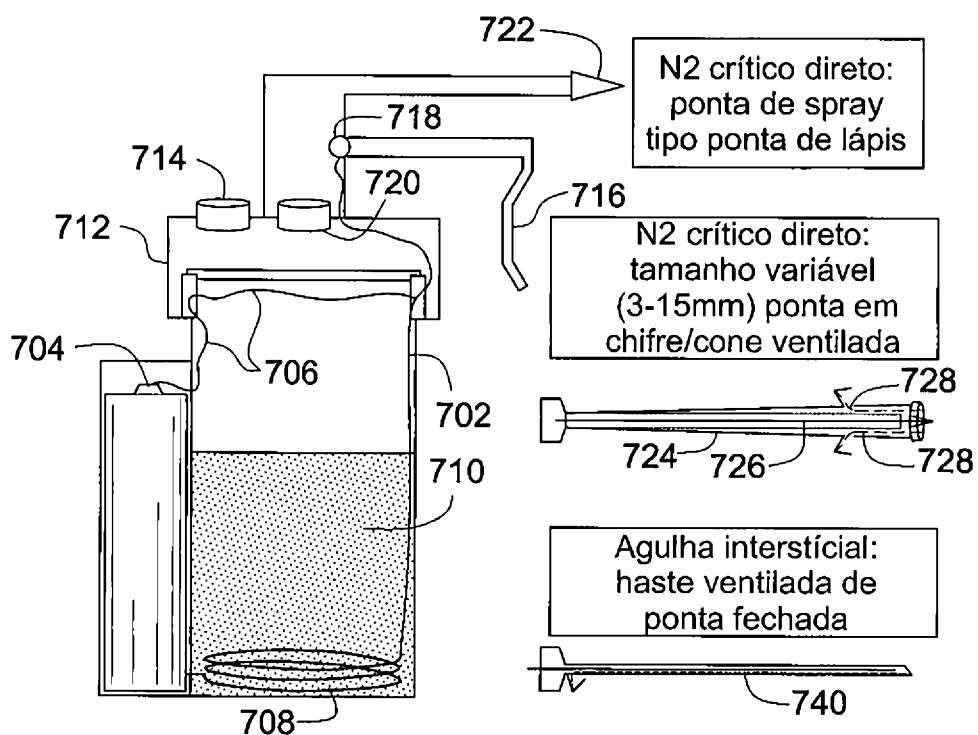


FIG. 7A

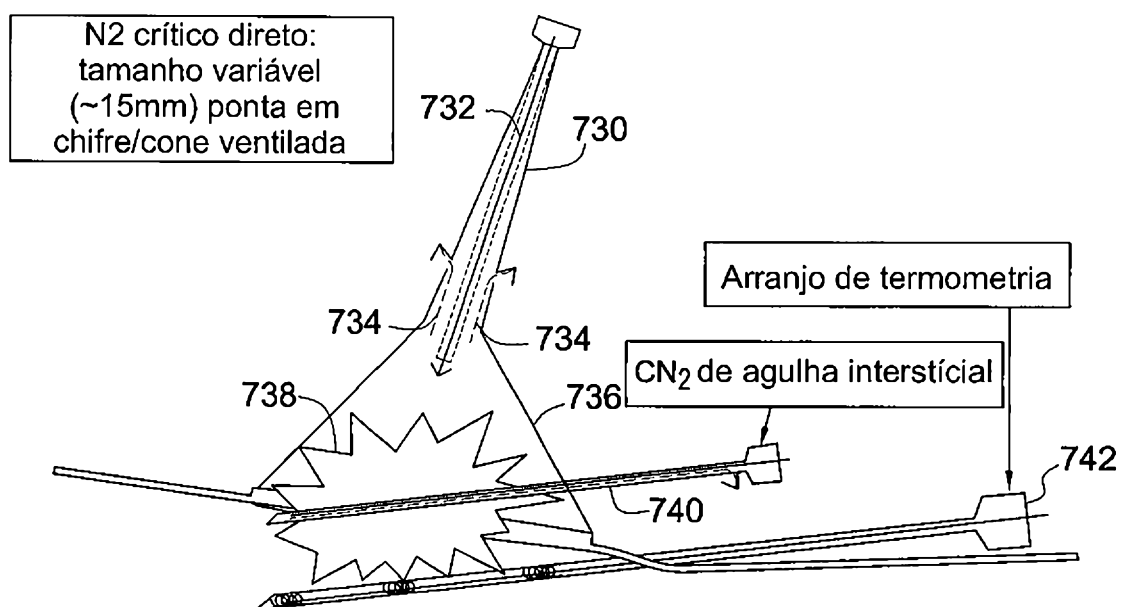


FIG. 7B

P10517550

8/8

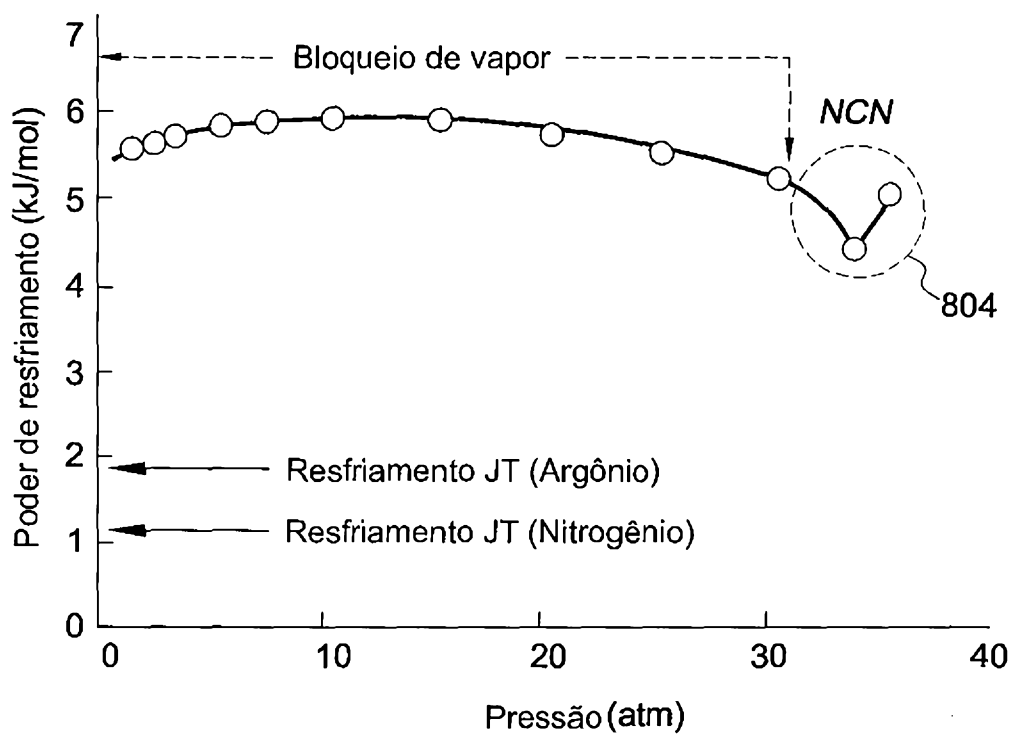


FIG. 8